

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.12.006

# 河北坝上高原如意河流域风积沙厚度空间展布预测方法

邵海<sup>1,2,3</sup>, 殷志强<sup>1,2\*</sup>, 王轶<sup>1</sup>, 邢博<sup>1,2</sup>, 彭令<sup>1,2</sup>, 王瑞丰<sup>4</sup>

SHAO Hai<sup>1,2,3</sup>, YIN Zhiqiang<sup>1,2\*</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, XING Bo<sup>1,2</sup>, PENG Ling<sup>1,2</sup>, WANG Ruifeng<sup>4</sup>

1. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

2. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;

3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

4. 河北省山区地质环境重点实验室, 河北 承德 067000

1. *China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;*

2. *Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China;*

3. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection(Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, Sichuan, China;*

4. *Hebei Key Laboratory of Mountain Geological Environment, Chengde 067000, Hebei, China*

**摘要:**不同的空间插值方法会对风积沙厚度空间分布预测精度产生重要影响。基于河北承德坝上高原东部如意河流域中游 152 组风积沙厚度数据,应用径向基函数人工神经网络(RBF-ANN)插值方法探究如意河流域中游风积沙厚度空间分布特征,并与地统计插值方法中的不同模型函数、确定性插值中的不同插值方法进行预测误差和计算结果对比分析。结果表明,在地统计插值方法中,经典贝叶斯克里金插值-幂半变异函数(EBK-Power)的插值效果最佳;在确定性插值方法中,径向基函数(RBF)插值效果最佳;RBF-ANN 插值较 EBK-Power 和 RBF 方法在平均绝对误差(MAE)上的改进大于 30%,在均方根误差(RMSE)上的改进大于 20%,RBF-ANN 插值更适用于如意河流域风积沙厚度空间分布预测。

**关键词:**风积沙;厚度;空间插值;RBF-ANN 插值;坝上高原

**中图分类号:**P62 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)12-2138-08

**Shao H, Yin Z Q, Wang Y, Xing B, Peng L, Wang R F. Prediction methods of spatial distribution of aeolian sand in Ruyi River Basin of Bashang Plateau, Hebei Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2138-2145**

**Abstract:** Different spatial interpolation methods will have an important influence on the prediction accuracy of the spatial distribution of aeolian sand thickness. Based on the data of 152 groups of aeolian sand thickness in the middle reaches of Ruyi River Basin in the east of Bashang Plateau, Chengde, this paper used the Radial Basis Function-Artificial Neural Network(RBF-ANN) interpolation method to explore the spatial distribution characteristics of aeolian sand thickness in this area, and compared the prediction error and calculation results among different model functions in geostatistical analyst method and different interpolation methods in deterministic interpolation method. The results showed that among the geostatistical analyst methods, the classical EBK-Power has the best interpolation effect and among the deterministic interpolation methods the RBF interpolation is the best. Compared with EBK-Power and RBF interpolation, RBF-ANN interpolation improves the mean absolute error by more than 30%, and the improvement on the root mean square error was more than 20%, so it was concluded that RBF-ANN interpolation was more suitable for predicting the spatial distribution of aeolian sand thickness in Ruyi River Basin.

**Key words:** aeolian sand; thickness; spatial interpolation; Radial Basis Function-Artificial Neural Network interpolation; Bashang plateau

收稿日期:2022-05-29;修订日期:2022-10-26

资助项目:中国地质环境监测院研发基金项目《地表基质中的土壤层厚度空间分布预测模型研究——以坝上高原如意河流域为例》(编号:20220107)、国家自然科学基金项目《构造差异隆升影响下顺构造地貌发育强度对大型滑坡的控制机理和孕灾模式——以美姑河流域为例》(批准号:41977258)、中国地质调查局项目《全国自然资源监测评价与智慧服务》(编号:DD20221761)和河北省重点研发计划项目《京津冀水源涵养区坝上生态环境脆弱带修复模式与立体监测技术综合研究》(编号:20374207D)

作者简介:邵海(1986-),男,在读博士生,高级工程师,从事地表基质与工程地质调查研究。E-mail:shaohai@mail.cgs.gov.cn

\*通信作者:殷志强(1980-),男,博士,正高级工程师,从事第四纪地质环境演化与地表基质研究。E-mail:yinzhizhiqiang@mail.cgs.gov.cn

厚度是风积沙重要的理化性质指标之一<sup>[1]</sup>,风积沙厚度可以影响地表植被生长和地表水文<sup>[2-4]</sup>,对地表植被覆盖度、植被类型、地表径流、土壤水分的时空格局、荒漠化防治等具有决定性作用<sup>[5-7]</sup>。通常情况下,风积沙厚度是通过开挖剖面、物探、钻探等方式来确定的,但单靠开挖剖面、物探、钻探等方式远不能满足实际应用和研究的需求。风积沙厚度的模拟预测也是地球表层多圈层交互带结构研究的重要内容,因此,如何获取风积沙厚度的空间分布在理论和实际应用上都具有重要意义<sup>[8-10]</sup>。

目前国内外对土壤层厚度空间插值的研究多集中在比较不同克里金插值方法和确定性插值方法的优劣性<sup>[11-13]</sup>。Peniek等<sup>[9]</sup>采用不同插值方法进行土壤厚度预测比较,得出协同克里金优于普通克里金、回归克里金和线性克里金的结论;Kuriakose等<sup>[10]</sup>比较了经验统计方法和地统计插值方法,认为回归克里金法预测土层厚度最优;李岩等<sup>[11]</sup>采用地统计插值和确定性插值共8种方法研究栗钙土层厚度的空间分布,结果表明最优的插值方法须根据具体情况具体分析,不存在适合所有土壤属性的万能插值方法<sup>[14-16]</sup>。在土壤有机质和地球化学元素含量空间分布特征预测研究中,应用径向基函数人工神经网络(RBF-ANN)插值方法与传统的地统计和确定性插值方法开展对比研究<sup>[17-18]</sup>,得出RBF-ANN空间插值预测效果较优<sup>[19-20]</sup>。但将RBF-ANN插值应用到风积沙厚度分布预测未见报道。对空间插值没有绝对最佳的方法,需要针对不同研究区域的实际情况,对调查采集的数据样本进行统计分析和试验比较,确定哪种插值方法更优。

本文以河北坝上高原如意河流域为例,研究应用地统计插值中的不同模型函数插值方法、确定性插值的不同插值方法和RBF-ANN插值方法探究如意河流域风积沙厚度空间分布特征,并分析不同插值方法的预测误差和插值结果分布,为如意河流域风积沙厚度分布图的绘制提供合适的空间插值方法,进而为其他类似地区风积沙厚度空间插值研究提供参考。

## 1 研究区地质环境及研究方法

### 1.1 研究区概况

如意河流域位于河北承德坝上高原东部,流域面积为196.7 km<sup>2</sup>,海拔为1250~1700 m,如意河道

长约65.1 km。地势由东北向西南低倾斜,地貌属侵蚀剥蚀山地和剥蚀堆积平原,区域构造属棋盘山中凹陷构造单元,为典型的森林-草甸草原过渡带<sup>①</sup>。气候属温带半湿润大陆性季风气候,近20年平均气温为-0.7℃,年平均降水量为468 mm,年平均蒸发量为1286 mm,年平均蒸发量是降水量的3倍左右<sup>②</sup>。冬季寒冷,1月份的平均气温为-21℃;年平均风速为3.4 m/s,最大风速可达28 m/s,年平均大风天数62 d,土壤风蚀严重,常形成沙尘暴<sup>[21]</sup>。如意河流域风积沙的分布范围较广,尤其在如意河流域中游呈集中分布特征,本文将如意河流域中游作为风积沙厚度空间插值方法的研究区。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据来源及处理

采用电测深法对研究区的风积沙厚度进行800 m×500 m网格扫描测量,共获取风积沙厚度数据152组,同时通过地面调查和开挖探槽方式对风积沙厚度数据进行验证,风积沙厚度数据真实反映了研究区风积沙厚度空间分布的客观情况。将152组风积沙厚度数据分为样本数据集136组、验证数据集16组,风积沙厚度调查点空间分布见图1。

#### 1.2.2 统计分析方法

采用SPSS 19.0统计软件进行风积沙厚度的平均值、标准差、变异系数等特征值统计分析,用Kolmogorov-Smirnov(K-S)方法检验正态分布特征。以Matlab 2019的神经网络工具箱为基础进行RBF-ANN插值计算。在ArcGIS 10.8地统计分析和空间分析模块进行风积沙厚度的分类统计、空间插值分析、数字制图等。

#### 1.2.3 空间插值方法

本文采用地统计插值、确定性插值和RBF-ANN插值进行比较,其中地统计插值采用普通克里金(OK)、泛克里金(UK)和经典贝叶斯克里金(EBK)3种方法,普通克里金的模型函数采用球面函数(Spherical)、三角函数(Triangle)、指数函数(Exponential)、高斯函数(Gaussian)、线性函数(Linear)5种,泛克里金(UK)的模型函数与一次漂移函数呈线性关系,经典贝叶斯克里金(EBK)的模型函数采用幂半变异函数(Power)、薄板样条半变异函数(TPS)2种。确定性插值采用反距离权重(IDW)、样条函数(S)、含障碍的样条函数(SB)、全局多项式插值(GP)、局部多项式插值(LP)、径向基函

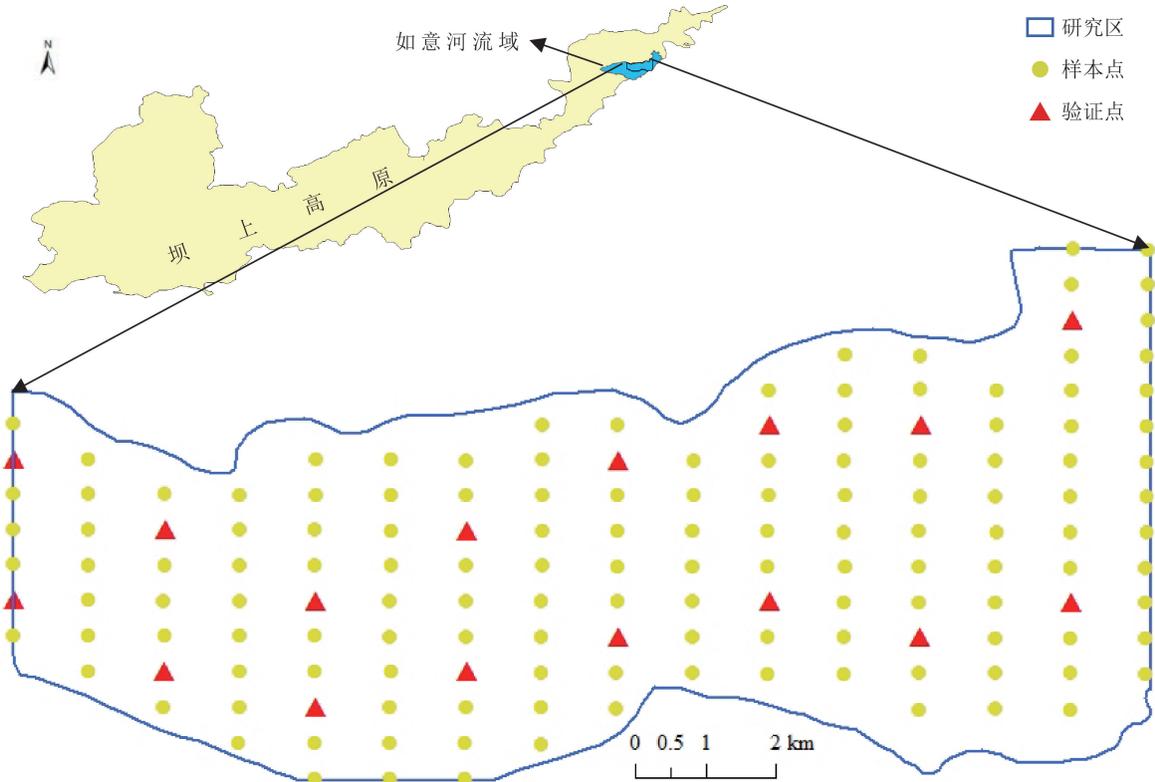


图1 如意河流域中游风积沙厚度调查点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution map of survey points of aeolian sand thickness in the middle reaches of Ruyi River Basin

数插值(RBF)、含障碍的核插值(KSB)7种方法。

RBF-ANN 为三层前向分析网络。第一层是由源节点组成的输入层,其功能为传递输入信号至隐层的非线性变换;第二层为隐含层,其传递函数由径向基函数组成;第三层为输出层,其节点函数为简单的线性函数。本文的 RBF-ANN 插值计算使用 newrbe 函数构建 RBF-ANN 模型,由扩展系数 spread 控制径向基函数的半径,用试凑法确定最佳的 spread 值,当训练精度达到 0.001 时,运算迭代停止。模型输入参数为坐标 (X, Y),并进行归一化处理以提高学习速度,模型输出为研究区不同空间位置风积沙厚度,最后通过数字制图分析研究区风积沙厚度空间分布特征<sup>[18, 22]</sup>。其中节点输出范围在 0~1 之间,输入样本越靠近节点中心,输出值就越大。

高斯核函数公式见式(1):

$$\mu_i = \exp\left[-\frac{(x-c_i)T(x-c_i)}{2\delta_i^2}\right], i=1, 2, \dots, N_n \quad (1)$$

式中: $\mu_i$ 为第  $i$  个隐含层节点的输出; $x$  为神经网络的输入; $c_i$ 为高斯函数的中间值; $\delta_i$ 为标准化常

数; $N_n$ 为隐含层节点数。

#### 1.2.4 模型检验方法

采用交叉检验和验证数据集检验进行如意河流域中游风积沙厚度插值结果精度检验。交叉检验法是通过计算所有 136 组剖面的风积沙实际厚度与预测值之间的误差,评判插值精度,采用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、标准化均方根误差(RMSSE)评估插值结果<sup>[11]</sup>。验证数据集检验通过比较验证点的风积沙厚度的预测值与实测值评价预测精度,采用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)表征插值精度。MAE 和 RMSE 这两个指标可以避免正负偏差互相抵消的情况,用来量化计算结果的平均误差<sup>[11]</sup>,MAE 和 RMSE 越小,空间预测结果越准确。RMSSE 最接近 1,如果标准化均方根误差小于 1,说明高估了预测值,反之为低估预测值。MAE 和 RMSE 的计算公式见式(2)和(3):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_{oi} - Z_{pi}| \quad (2)$$

$$RMES = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{oi} - Z_{pi})^2} \quad (3)$$

式中:  $Z_{oi}$  为验证点风积沙厚度的调查数据;  $Z_{pi}$  为预测数据;  $n$  为验证点数量。

## 2 结果分析

### 2.1 风积沙厚度统计分析

对如意河流域风积沙厚度数据采用单样本 K-S 方法进行检验, 样本数据集和验证数据集的渐近显著性(双侧)值分别为 0.062 和 0.731, 如意河流域风积沙厚度的验证数据集和样本数据集均为正态分布。如意河流域风积沙厚度的验证数据集和样本数据集的变异系数均为 0.92, 属中等变异。在验证数据集中, 风积沙厚度的各项统计特征值与样本数据集中的相应统计特征值比较接近, 说明 2 组数据分布基本相同、验证数据集的选点较合理。如意河流域风积沙厚度的验证数据集和样本数据集统计特征值见表 1。

### 2.2 风积沙厚度的插值预测方法比较

#### 2.2.1 地统计插值方法比较

为比较 OK 插值方法下不同半变异函数模型拟

合的精度情况, 对 OK 插值方法下的 Spherical、Triangle、Exponential、Gaussian、Linear 五种函数模型分别进行精度验证。样本数据集的不同模型交叉校验结果表明, Exponential 的 MAE 远小于其他 4 种函数, MAE 最大的为 Linear; RMSE 最小的为 Exponential, 其次为 Spherical 和 Triangle, 最大的为 Gaussian; RMSSE 最接近 1 的为 Exponential。从验证数据集的校验看, MAE 最小的为 Linear, 其次为 Spherical 和 Triangle, 最大的为 Exponential; RMSE 最小的为 Exponential, 其次为 Spherical, 最大的为 Linear。通过误差结果分析, Spherical 和 Exponential 较其他函数模型更好。利用 OK-Spherical、OK-Exponential 与 UK、EBK-Power、EBK-TPS 插值方法进行预测精度的对比分析, EBK-Power 的 MAE 和 RMSE 最小, EBK-Power 的 RMSSE 最接近 1。在综合误差结果分析和对实测数据的反映方面, EBK-Power 插值方法较其他插值方法更好。风积沙厚度的地统计插值方法预测精度分析见表 2。

表 1 如意河流域中游风积沙厚度统计特征值

**Table 1 Statistical characteristic value of aeolian sand thickness in the middle reaches of Ruyi River Basin**

项目	样本个数	最大值/m	最小值/m	平均值/m	偏度	峰度	标准差/m	变异系数
样本数据集	136	12.00	0	2.66	1.37	1.95	2.45	0.92
验证数据集	16	8.00	0	2.38	1.25	1.41	2.19	0.92

表 2 风积沙厚度的地统计插值方法预测精度

**Table 2 Prediction accuracy analysis of geostatistical interpolation method for aeolian sand thickness**

数据集类型	插值方法	模型函数类型	MAE	RMSE	RMSSE		
样本数据集	普通克里金(OK)	球面函数(Spherical)	0.0475	1.47	1.1652		
		三角函数(Triangle)	0.0551	1.52	1.1649		
		指数函数(Exponential)	0.0121	0.77	1.0812		
		高斯函数(Gaussian)	0.0556	1.76	1.1650		
		线性函数(Linear)	0.0749	1.62	1.1648		
	泛克里金(UK)	与一次漂移函数成线性关系(LLD)	0.1840	1.72	1.0814		
	经典贝叶斯克里金(EBK)	与一次漂移函数成线性关系(LLD)	幂半变异函数(Power)	0.0036	0.26	0.9706	
			薄板样条半变异函数(TPS)	0.0716	1.18	0.9512	
		验证数据集	普通克里金(OK)	球面函数(Spherical)	0.0254	1.74	
				三角函数(Triangle)	0.0254	1.75	
指数函数(Exponential)				0.0405	1.68		
高斯函数(Gaussian)	0.0308			1.77			
线性函数(Linear)	0.0250			1.78			
泛克里金(UK)	与一次漂移函数成线性关系(LLD)	0.0766	1.71				
经典贝叶斯克里金(EBK)	与一次漂移函数成线性关系(LLD)	幂半变异函数(Power)	0.0956	1.58			
		薄板样条半变异函数(TPS)	0.0687	1.57			

从预测结果看,OK、UK 和 EBK-TPS 插值方法均低估了局部风积沙厚度的最大值信息,不符合实际情况。EBK-Power 插值对风积沙厚度的高值区和低值区的预测优于其他地统计插值方法。从对研究区整体和局部趋势的综合预测结果看,EBK-Power 插值的预测效果在局部细节上比其他地统计插值方法更好(图 2),风积沙厚度的地统计插值方法预测结果分析见表 3。综合各种误差大小和预测趋势效果,地统计插值方法中以 EBK-Power 的插值效果最佳。

2.2.2 确定性插值方法比较

对确定性插值的 IDW、S、SB、GP、LP、RBF、

KSB 七种插值方法进行精度验证和对比分析。从样本数据集的验证结果看,SB 计算的 MAE 和 RMSE 均为 0,这与 SB 的算法原理有关;MAE 最小的为 IDW,其次为 RBF 和 GP,最大的为 KSB;RMSE 最小的为 RBF,其次为 S 和 IDW,最大的为 GP。从验证数据集的校验看,MAE 最小的为 KSB,其次为 LP、RBF 和 IDW,且 MAE 相差不大,最大的为 GP;RMSE 最小的为 RBF,最大的为 GP。从样本数据集和验证数据集误差验证综合效果看,确定性插值的 7 种方法中,以 RBF 较优。风积沙厚度的确定性插值方法预测精度分析见表 4。

从预测结果看,采用 IDW、SB、LP、RBF 和 KSB

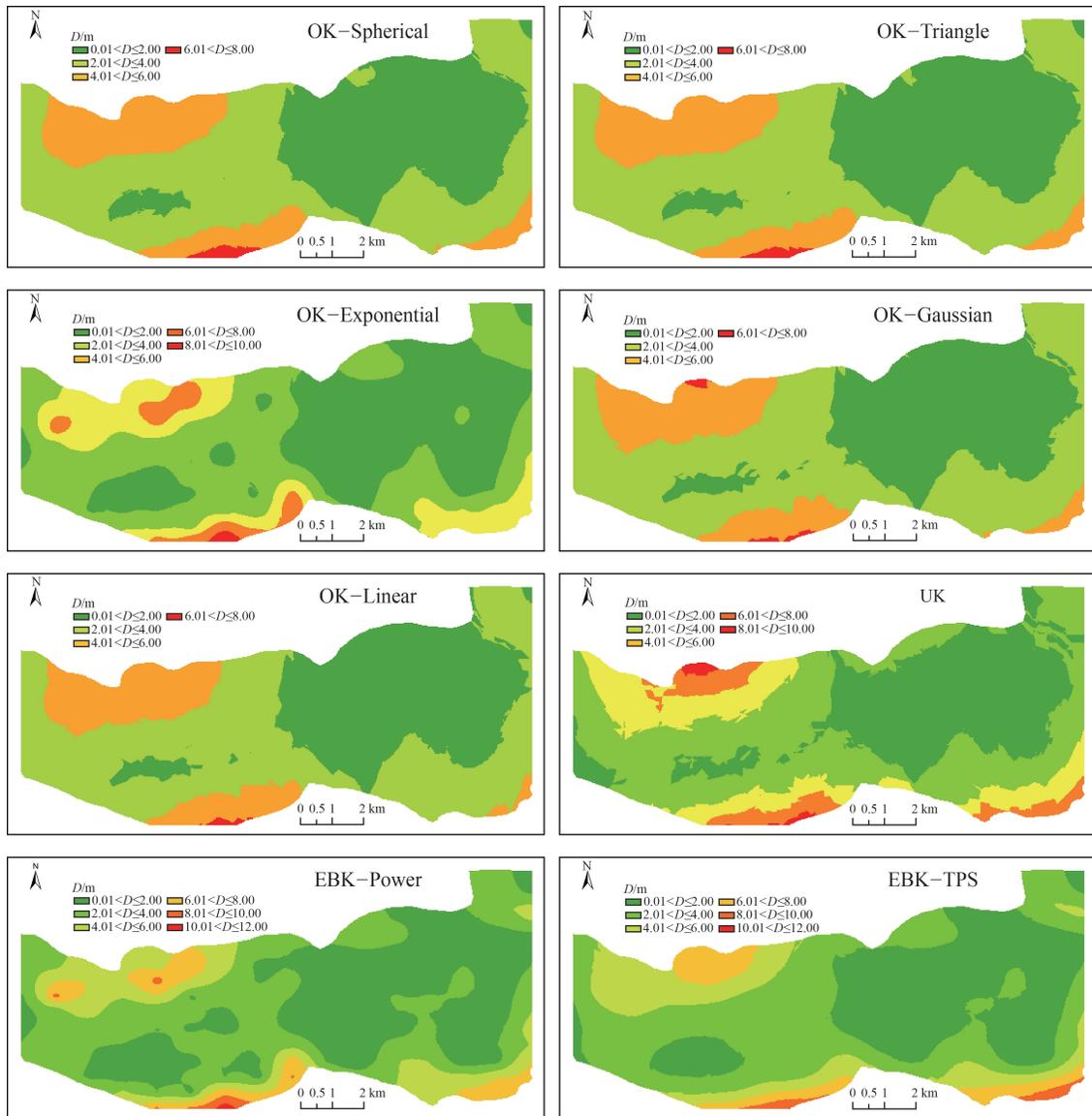


图 2 不同地统计插值方法的风积沙厚度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of aeolian sand thickness by different geostatistical interpolation methods

表 3 风积沙厚度的地统计插值方法预测结果

Table 3 Prediction result analysis of geostatistical interpolation method for aeolian sand thickness

插值方法	模型函数类型	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m
普通克里金(OK)	球面函数(Spherical)	7.32	0.24	2.63	1.35
	三角函数(Triangle)	7.08	0.24	2.62	1.33
	指数函数(Exponential)	9.96	0.14	2.65	1.60
	高斯函数(Gaussian)	6.30	0.25	2.63	1.29
	线性函数(Linear)	6.59	0.24	2.60	1.28
泛克里金(UK)	与一次漂移函数成线性关系(LLD)	9.34	0.24	2.91	1.66
经典贝叶斯克里金(EBK)	幂半变异函数(Power)	11.41	0.05	3.12	1.79
	薄板样条半变异函数(TPS)	10.03	0.08	2.81	1.83

插值的风积沙厚度最大值、最小值、平均值和标准差均一致;采用 S 插值的结果出现负值,且插值的最大值异常高,预测结果与实际情况不相符;采用 GP 插值的结果远小于实测值,与实际情况不符。从对研究区整体和局部趋势的综合预测结果看,RBF 插值的预测效果在局部细节上比其他地统计插值方法刻画得更好(图 3),风积沙厚度的确定性插值方法预测结果分析见表 5。综合各种误差大小和预测趋势效果,确定性插值方法中以 RBF 的插值效果最佳。

表 4 风积沙厚度的确定性插值方法预测精度

Table 4 Prediction accuracy analysis of deterministic interpolation method for aeolian sand thickness

插值方法	样本数据集		验证数据集	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
反距离权重(IDW)	0.0003	0.08	0.0252	1.72
样条函数(S)	0.0055	0.04	0.0528	1.97
含障碍的样条函数(SB)	0	0	0.1514	1.79
全局多项式插值(GP)	0.0048	2.34	0.4271	2.21
局部多项式插值(LP)	0.1281	0.94	0.0162	1.68
径向基函数插值(RBF)	0.0036	0.03	0.0228	1.61
含障碍的核插值(KSB)	0.1362	1.17	0.0081	1.62

表 5 风积沙厚度的确定性插值方法预测结果

Table 5 Prediction result analysis of deterministic interpolation method for aeolian sand thickness

插值方法	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m
反距离权重(IDW)	11.41	0.05	3.12	1.79
样条函数(S)	17.58	-6.41	2.70	2.52
含障碍的样条函数(SB)	11.41	0.05	3.12	1.79
全局多项式插值(GP)	3.88	1.00	2.69	0.65
局部多项式插值(LP)	11.41	0.05	3.12	1.79
径向基函数插值(RBF)	11.41	0.05	3.12	1.79
含障碍的核插值(KSB)	11.41	0.05	3.12	1.79

### 2.2.3 地统计插值、确定性插值和 RBF-ANN 插值方法比较

将地统计插值方法中的 EBK-Power、确定性插值方法中的 RBF 与 RBF-ANN 进行预测精度对比分析,RBF-ANN 相对传统的 EBK-Power 和 RBF 方法在 MAE 上的改进大于 30%,在 RMSE 上的改进大于 20%,RBF-ANN 对于如意河流域的风积沙厚度进行预测最优(表 6)。插值得到精度为  $0.000269^{\circ} \times 0.000269^{\circ}$  的网格图像,网格最大值为 11.41 m,最小值为 0.05 m,平均值为 3.12 m,标准差为 1.79 m,变异系数为 0.57。分析数值统计结果,预测的平均值较实测值大,但差距不大;预测的最大值与最小值与实测值相差较小,同时 RBF-ANN 插值结果的标准差比实测值的标准差小,说明 RBF-ANN 插值有平滑数据的作用。

## 3 讨论

分析如意河流域风积沙厚度空间分布预测结果,RBF-ANN 插值的预测误差小于地统计插值和确定性插值的预测误差,RBF-ANN 插值的预测精

表 6 风积沙厚度的不同插值方法预测精度分析

Table 6 Analysis of prediction accuracy of aeolian sand thickness by different interpolation methods

插值方法	样本数据集		验证数据集	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
经典贝叶斯克里金-幂半变异函数(EBK-Power)	0.0036	0.26	0.0687	1.67
径向基函数插值(RBF)	0.0036	0.03	0.0228	1.61
径向基函数人工神经网络(RBF-ANN)	0.0025	0.02	0.0170	1.28

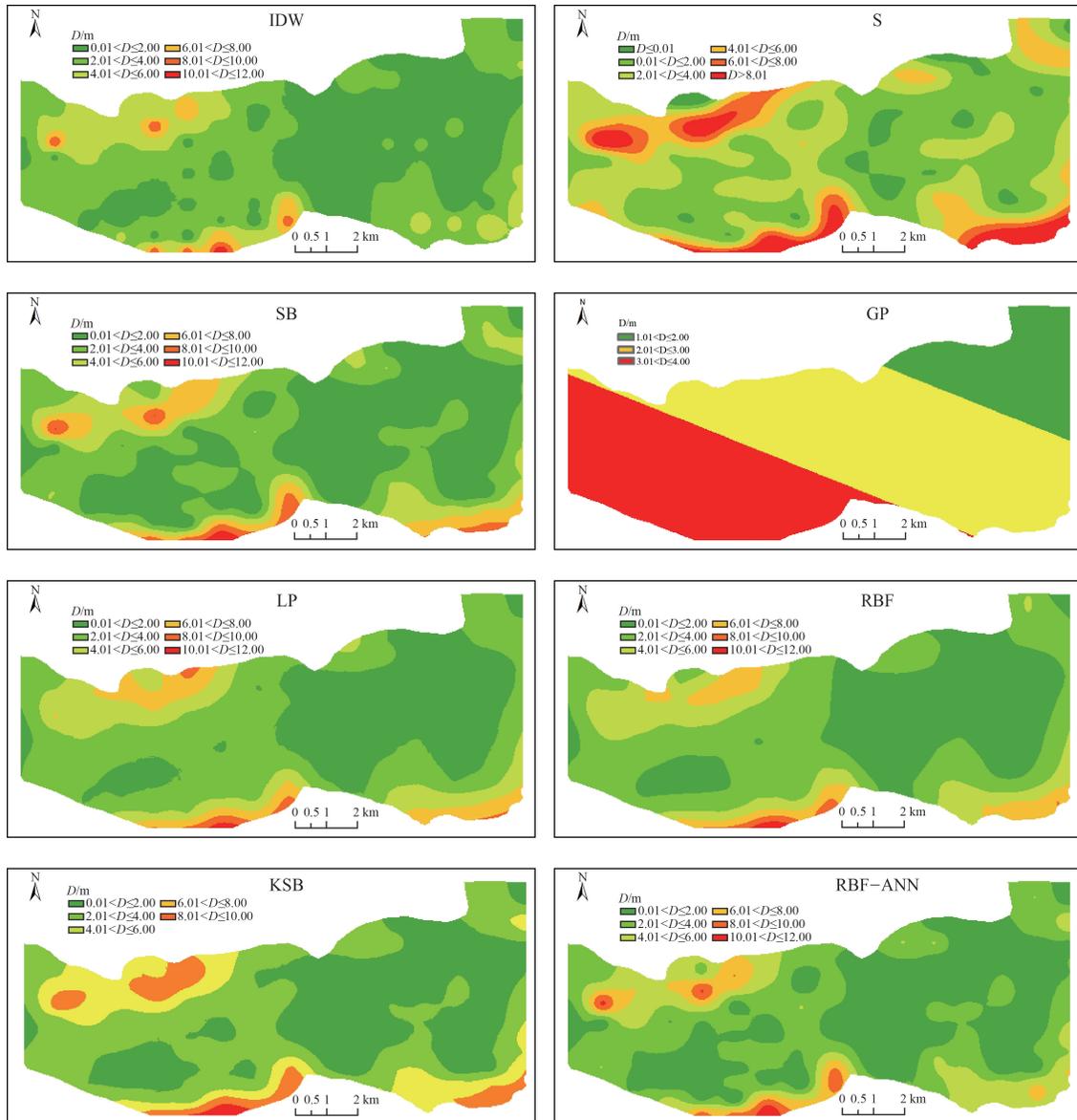


图3 不同确定性插值方法和 RBF-ANN 插值方法的风积沙厚度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of aeolian sand thickness with different deterministic interpolation methods and RBF-ANN interpolation methods

度更高,更能体现研究区风积沙厚度的高值区和低值区分布的真实细节及变化规律,预测结果更精确,更符合研究区风积沙厚度空间分布的复杂情况。因为 RBF-ANN 插值是基于 RBF-ANN 的高斯核函数,具有强大的非线性拟合能力,能以任意精度逼近任意函数。用已知调查点的风积沙厚度作为期望输出对网络进行训练,可更好地模拟地表空间位置的风积沙厚度空间分布,RBF-ANN 插值更适合研究区风积沙厚度空间分布预测,RBF-ANN 插值的风积沙厚度分布具有更丰富的细节信

息和更合理的空间变化信息。后续研究可将研究区的面积扩大而调查点数量减少,补充完善 RBF-ANN 插值预测的尺度变化情况。

#### 4 结论

基于如意河流域中游 152 组风积沙厚度数据,应用地统计插值的 8 种不同模型函数插值方法、确定性插值的 7 种不同插值方法和 RBF-ANN 插值方法探究如意河流域风积沙厚度空间分布特征,分析不同插值方法的预测误差和插值结果分布,得到

以下结论。

(1)如意河流域风积沙厚度样本数据集和验证数据集范围分别为0~12 m和0~8 m,属中等程度空间变异。

(2)综合各种误差大小和预测趋势效果,在统计插值方法中,EBK-Power的插值效果最佳;在确定性插值方法中,RBF的插值效果最佳。

(3)RBF-ANN插值的模型拟合较好,RBF-ANN相对传统的EBK-Power和RBF方法在MAE上的改进大于30%,在RMSE上的改进大于20%,RBF-ANN对于如意河流域的风积沙厚度进行预测最优。

**致谢:**成文过程中得到中国地质环境监测院周平、殷秀兰研究员、万利勤正高级工程师、李霞高级工程师、河北水文工程地质勘察院周智勇正高级工程师、邢英梅高级工程师等专家的宝贵意见,在此一并致以衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] 殷志强,秦小光,张蜀冀,等.地表基质分类及调查初步研究[J].水文地质工程地质,2020,47(6):14-20.
- [2] 何煦,桑琦明,郑粉莉,等.东北不同黑土厚度区多营力作用的坡面土壤侵蚀试验研究[J].水土保持学报,2021,35(1):103-109,115.
- [3] 张珍明,周运超,黄先飞,等.喀斯特小流域土壤有机碳密度空间异质性及影响因素[J].自然资源学报,2018,33(2):313-324.
- [4] 易湘生,李国胜,尹衍雨,等.土壤厚度的空间插值方法比较—以青海三江源地区为例[J].地理研究,2012,31(10):1793-1805.
- [5] 金保明,林鹏,李光敦.基于运动波壤中流理论与无限边坡稳定分析理论的滑坡预测模型[J].工程科学与技术,2021,53(4):140-148.
- [6] 王占亮,卫晓锋,魏浩,等.河北坝上小滦河流域不同沉积单元粒度特征及其荒漠化的影响[J].矿产勘查,2021,12(4):1000-1007.
- [7] 安永龙,黄勇,张艳玲,等.北京房山南部地区富硒土壤生物有效性特征及来源[J].地质通报,2020,39(2/3):387-399.
- [8] Liu J, Chen X, Lin H, et al. A simple geomorphic-based analytical model for predicting the spatial distribution of soil thickness in headwater hillslopes and catchments[J]. Water Resources Research, 2013, 49(11): 7733-7746.
- [9] Peniek V, Borvka L. Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: A comparison of methods[J]. Plant Soil and Environment, 2006, 52: 424-430.
- [10] Kuriakose S L, Devkota S, Rossiter D G, et al. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India[J]. Catena, 2009, 79(1): 27-38.
- [11] 李岩,尚士友,阿拉塔其其格,等.典型草原栗钙土层厚度空间插值方法研究[J].中国农机化学报,2015,36(1):344-348.
- [12] 杨阳,李飒,何福耀,等.半变异函数及取样间距对克里金法在海洋地层分析中的影响研究[J].工程地质学报,2019,27(4):794-802.
- [13] 安永龙,万利勤,李霞,等.承德市土壤重金属空间结构与分布特征[J].水文地质工程地质,2020,47(6):119-131.
- [14] 乔冈,徐友宁,陈华清,等.宁东煤矿区地裂缝对植被生态环境的影响[J].地质通报,2018,37(12):2176-2183.
- [15] 孟晖,李春燕,张若琳,等.全国地质环境承载能力评价[J].地质通报,2021,40(4):451-459.
- [16] 史帅航,白甲林,余洋.西南地区某矿产集采区土壤重金属迁移规律及生态风险评价[J].金属矿山,2022,(2):194-200.
- [17] 陈飞香,程家昌,胡月明,等.基于RBF神经网络的土壤铬含量空间预测[J].地理科学,2013,33(1):69-74.
- [18] 谢梦姣,王洋,康营,等.人工神经网络与普通克里金插值法对土壤属性空间预测精度影响研究[J].生态与农村环境学报,2021,37(7):934-942.
- [19] Chen X Y, Liu D H, Yin P, et al. Temporal and spatial evolution of surface sediments characteristics in the Dagu River estuary and their dynamic response mechanism[J]. China Geology, 2019, (3): 325-332.
- [20] Ji Y K, Liu C L, Zhang Z, et al. Experimental study on characteristics of pore water conversion during methane hydrates formation in unsaturated sand[J]. China Geology, 2022, (5): 276-284.
- [21] 邵海,王英男,殷志强,等.承德坝上高原如意河流域地表基质层调查与编图探索[J/OL].水文地质工程地质,2022,10.25.https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2202.p.20221025.1148.002.html.
- [22] 王铭鑫,范超,高秉博,等.融合半变异函数的空间随机森林插值方法[J].中国生态农业学报,2022,30(3):451-457.
- ① 殷志强,邵海,庞菊梅,等.承德资源环境承载能力综合地质调查与评价2021年延续报告.中国地质环境监测院,2020:1-104.
- ② 殷志强,邢博,邵海,等.支撑塞罕坝生态屏障建设水平衡和科学绿化研究取得新认识.中国地质调查局《地质调查专报》,2021.